

# 論文 実構造物におけるコンクリートの超音波による品質評価

山下英俊<sup>\*1</sup>・堺孝司<sup>\*2</sup>・熊谷守晃<sup>\*3</sup>・喜多達夫<sup>\*4</sup>

**要旨**：超音波法を用いたコンクリート構造物の品質評価方法は、非破壊試験の1つとして位置づけられている。しかし、データのばらつきが大きいため一般的に用いられるには至っていない。著者らはこれまでコンクリート中の骨材の影響を取り除くことで、超音波法によってもコンクリートの品質を精度よく評価することが可能であることを示してきた。本研究では、本手法を実構造物のコンクリート柱に適用し、構造物中のコンクリートの品質の違いを明確に評価できることが分かった。

**キーワード**：超音波伝播速度、細孔構造、品質評価、トモグラフィー、実構造物

## 1. はじめに

コンクリート構造物の品質を評価する手法としては、コンクリート打込み前のスランプや空気量の品質検査およびサンプル供試体の圧縮強度試験が一般的である。しかし、これらの手法は、施工後のコンクリートの品質を評価するものではない。また、コンクリート構造物の品質を評価する手法としては、多くの非破壊試験が提案されているが、測定値のばらつきが大きいことや測定制限などが多いため、定量的にコンクリートの品質を評価することは難しいとされてきた。近年、コンクリート構造物の性能照査型設計法が議論されており、コンクリート構造物を構成する材料の性能を定量的に評価することが重要な課題である。また、長期にわたるコンクリートの劣化予測を精度よく行うことも、性能照査型設計法を満足させるためには必要となってくる。すなわち、施工後のコンクリート構造物の品質を合理的に評価できる手法の開発が強く望まれている。著者ら<sup>1), 2)</sup>はこれまで室内試験において、ペースト、モルタル、コンクリートについて、伝播速度とコンクリートの耐久

性に大きく影響するセメント硬化体の細孔構造や骨材の関係について検討してきた。また、トモグラフィーにより、部位毎の品質の違いを定量的に評価する手法について整理した。本研究では、これらの手法を実構造物に適用し、その有効性について検討を行った。

## 2. 調査概要

### 2.1 対象構造物の概要

対象構造物は、海岸に面した覆道柱であり、新設および約20年前に施工された構造物で測定を行った。詳細を表-1に示す。新設構造物は2柱を対象としたが、これらは同一箇所、同一時期に施工したにも関わらず、構造上問題になるほどではないが、乾燥収縮と思われるひび割れの発生状況に差が生じた。長期の耐久性を考

表-1 調査構造物の詳細

覆道名	設置場所	材齢28日 降ひ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	竣工後 年数 (年)	劣化状況
A覆道	海岸沿い	24	1	乾燥収縮ひび割れ やや多い
B覆道	海岸沿い	24	1	乾燥収縮ひび割れ 若干あり
C覆道	海岸沿い	24	20	乾燥収縮ひび割れ 多い 錆汁あり

- \*1 ㈱間組 技術本部技術研究所技術研究部 工博 (正会員)
- \*2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)
- \*3 北海道開発局 開発土木研究所構造部 (正会員)
- \*4 ㈱間組 技術本部技術研究所技術研究部 (正会員)

慮すると、今後の劣化状況に差が生じると思われる。また、約20年前に施工された構造物は、冬季には季節風による波しぶきが付着する状況にあり、凍害や塩害による劣化により、柱の方向毎に品質が異なっていると思われる。

## 2.2 現場調査および室内試験内容

現場調査および室内試験は、図-1に示す手順で行った。また、調査位置およびコア採取の概要を図-2に示す。表面強度は、各面毎に上部、下部の反発硬度をランダムに20点測定し、最大値と最小値を取り除いた18点の平均で示した。表面伝播速度は、表面強度と同一箇所ですべての測線の伝播速度を測定し、その平均値を求めた。

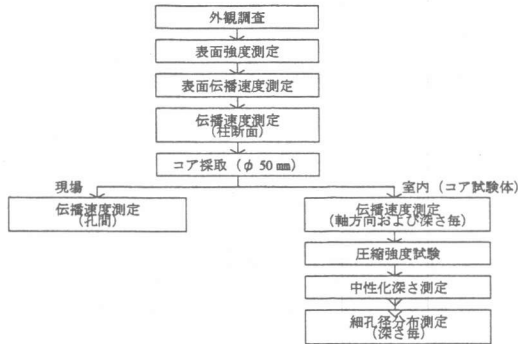


図-1 調査手順

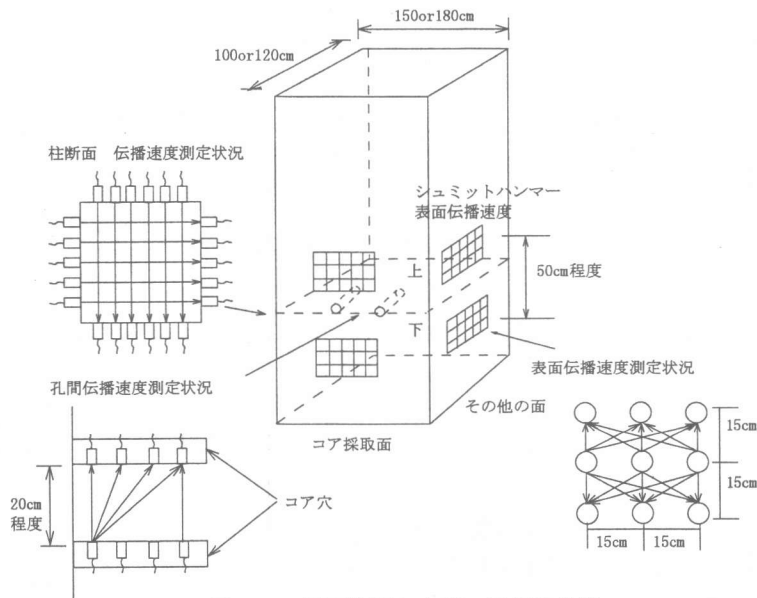


図-2 調査位置およびコア採取位置

柱断面伝播速度は、柱端部から中心部に向かって断面の伝播速度を測定した。孔間（2本のコア穴間）伝播速度は、孔間（約20cm）の伝播速度をコンクリート表面から深さ方向で測定した。コアの伝播速度は、採取した供試体の軸方向と断面方向の深さ毎に測定した。なお、孔間の伝播速度の測定は、40KHz（小型）センサーを、その他は28KHzのセンサーを使用した。

## 3. 調査および試験結果

### 3.1 現場調査結果

現場調査結果を表-2に示す。柱面毎の表面強度は、全体的には乾燥収縮ひび割れの多いA覆道が乾燥収縮ひび割れの少ないB覆道より若干大きくなっており、表面の状況と必ずしも一致していなかった。C覆道では、呼び強度が同じにも関わらず、A、B覆道よりも表面強度は大きくなっていった。これは材齢の影響と思われる。柱面毎の表面伝播速度は、全体的にはC覆道が最も速く、B覆道、A覆道の順番となっている。C覆道が最も速いのは、表面強度の結果と一致するが、A覆道とB覆道の関係は逆にな

っている。これらの結果から、コンクリートの品質の違いは、表面強度や表面伝播速度で定性的には評価できるが、定量的に評価するのは難しいと思われる。

### 3.2 コア試験体の試験結果

コア試験体の試験結果を表-3に示す。圧縮強度は、表面強度と同様にC覆道が最も大きく、A、B覆道はほぼ同様の結果となった。中性化はともにほとんど進行していない。これは、海岸部のため海水による水の供給が多いためと思われる。総細孔量は、全体的にはC覆道が最も少なく、B覆道、A覆道の順番となっている。深さ毎には、それぞれの覆道ともさほど差はないが、若干表面部が内部より多い傾向にある。

軸方向の伝播速度は、B、C覆道がほぼ同じ値を示し、A覆道が遅くなっている。A覆道とB覆道では、圧縮強度はほぼ同じであるが、伝播速度に差が生じた。原因として骨材の影響やペースト部の品質の違いが考えられる。

### 3.3 各評価指標の結果の関係

#### (1) 表面強度と表面伝播速度の関係

表面強度と表面伝播速度の関係を図-3に示す。それぞれの柱における差がさほど大きくないため明確ではないが、表面強度が大きいほど、表面伝播速度が大きくなる傾向が認められる。

#### (2) 表面強度とコア試験体の圧縮強度の関係

表面強度と圧縮強度の関係を図-4に示す。表面強度が大きいほど圧縮強度は大きくなる傾向があった。

#### (3) コア伝播速度と表面伝播速度の関係

コア軸方向の伝播速度と表面伝播速度の関係を図-5に示す。コア伝播速度と表面伝播速度の関係には明確な傾向は見られなかった。これは、コンクリート表面の品質と内部の品質は、必ずしも対応しないことを示している。

### 3.4 トモグラフィーによる品質評価結果

#### (1) 柱断面の測定結果

柱断面の測定結果を図-6に示す。C覆道においては、コンクリートの内部と表面の差が明確ではなかったが、A、B覆道ではコンクリート表面の方が伝播速度が遅いのが認められる。特にA覆道では、表面部の伝播速度が他と比べ

表-2 現場調査結果

	表面強度 (N/mm <sup>2</sup> )		表面伝播速度 (m/sec)	
	山側	北側	山側	北側
A覆道	34.2	34.1	1937	2016
	34.3		2021	
	34.0	2090		
B覆道	31.2	32.1	2302	2242
	32.4		2375	
	32.6		2050	
C覆道	49.6	48.1	2530	2555
	46.6		2580	

表-3 試験結果

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	中性化深さ (mm)	総細孔量 (cc/g)				伝播速度 (m/sec)
			0~20mm	20~40mm	40~60mm	60~80mm	
A覆道	48.0	2	0.0849	0.0846	0.0784	0.0750	3707
B覆道	48.6	0	0.0639	0.0741	0.0695	0.0728	4105
C覆道	海側	4	0.0584	0.0662	-	-	4177
	山側	4	0.0696	0.0658	-	-	4281

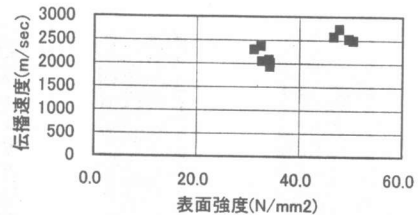


図-3 表面強度と表面伝播速度の関係

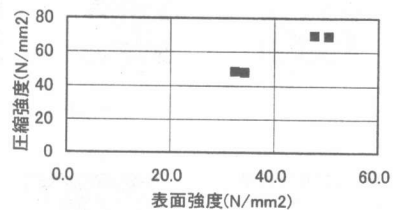


図-4 表面強度と圧縮強度の関係

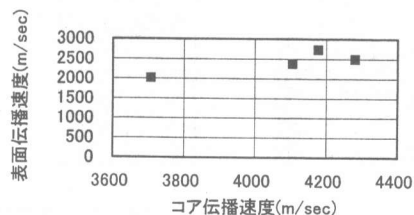


図-5 コア伝播速度と表面伝播速度の関係

て遅くなっており、表面の品質が良くないことを示していると思われる。コンクリートの品質はコンクリート自体の品質とひび割れ等の欠陥の両方を含むため、現状ではこれらを分けて評価することは困難である。そこで、ここでは全体としての評価を行っている。

(2) 孔間の測定結果

孔間の測定結果を図-7に示す。柱断面の結果と同様に、コンクリート表面部の伝播速度が内部よりも遅くなっているのが認められる。測

定間隔等にもよるが、断面の測定よりもその傾向は明確になっている。A、B覆道では、表面より2cm程度まで、C覆道では2~5cm程度まで伝播速度の低下があり、鉄筋かぶりが5~6cm程度であることを考慮すると、長期の耐久性において何らかの影響があることが予想される。

(3) コア試験体の測定結果

コア試験体の測定結果を図-8に示す。現場で測定したものに比べ、コンクリート表面部と内部の伝播速度の差は認められなかった。図-

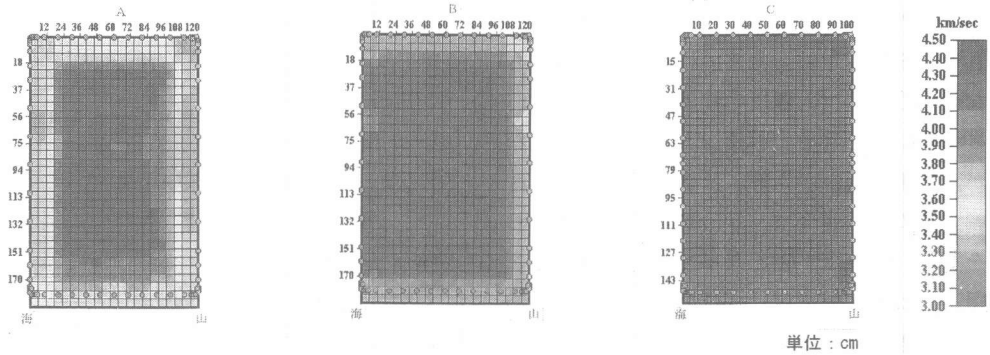


図-6 柱断面トモグラフィーの結果

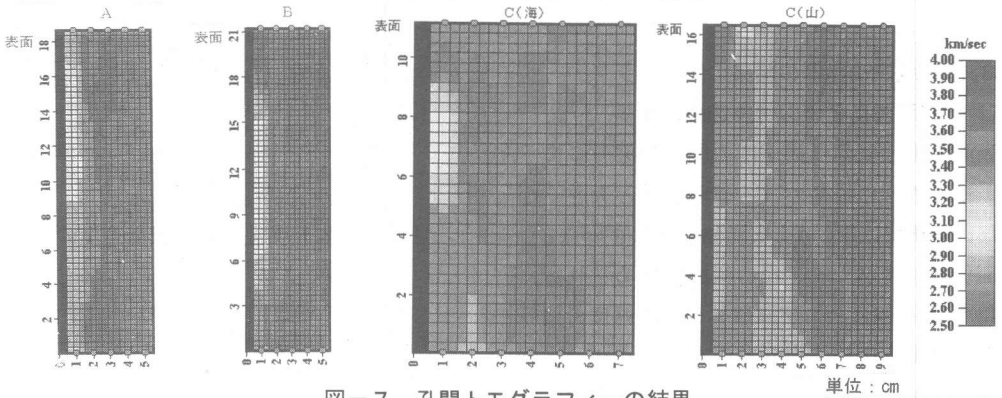


図-7 孔間トモグラフィーの結果

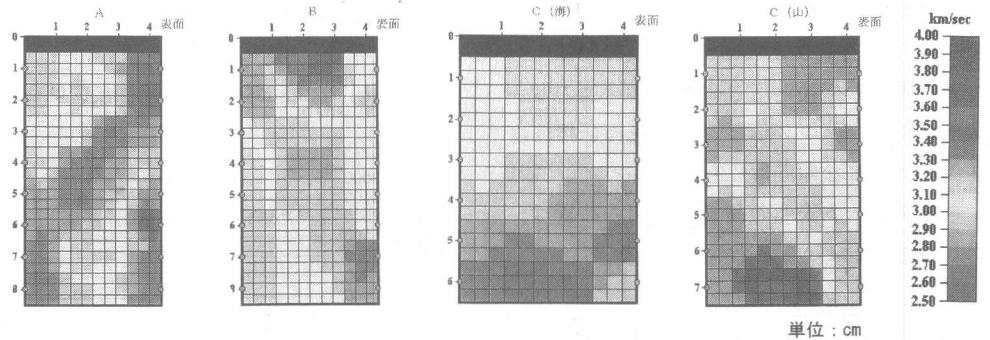


図-8 コア供試体トモグラフィーの結果

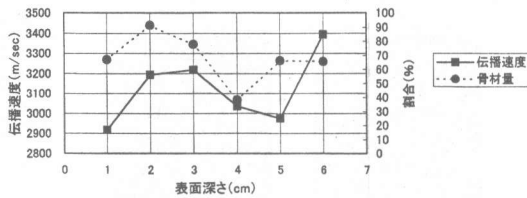


図-9 骨材量の影響

9に骨材量と伝播速度の関係の一例を示すが、骨材量が多いほど伝播速度は速くなる傾向があり、伝播速度に与える骨材の影響が大きいことが再確認された。伝播速度でコンクリートの品質を評価する場合、骨材量のばらつきをなくするため、極力センサー間の距離が大きいほど有効と思われる。すなわち、可能な限り現場において孔間の測定を行うのが良い。なお、ここで示した骨材量は、コア試験体の伝播速度を測定した後、縦方向に切断し、伝播速度を測定した線上において、目視で確認できる範囲で求めた。

#### 4. コンクリートの品質評価への応用

昨年まで行ってきた試験結果と実構造物へ適用した本研究の結果を比較し、本評価手法の有効性について検討する。

##### 4.1 昨年度の結果との比較

実構造物から採取した試験体などから、修正伝播速度と有効細孔量を求め、昨年度の結果<sup>2)</sup>と比較したものを図-10に示す。有効細孔量と修正伝播速度の関係は本研究で適用した実構造物でもほぼ同一関係にあることが認められ、このことから伝播速度を測定することにより、コンクリートの品質を評価することの可能性があることが分かった。なお、表-4に計算に用いた条件を示す。A、B覆道は使用したと思われる骨材の伝播速度を測定できたが、C覆道では、骨材の伝播速度が明確でなかったため、B覆道の骨材と同様と仮定して計算した。

##### 4.2 コンクリートの品質評価

実構造物のコンクリートの品質を評価する場合には、その都度コア採取したり、採取したコアを分析することが難しい場合も多い。そこで、

実構造物のコンクリートの品質を評価する場合の手順を図-11に示す。現時点では、まだ明確に評価できない部分もあるが、いくつかの仮定条件を設けて行うこととする。また、既往の研究でもセンサーの周波数や種類によって、同一試験体を測定した場合でも結果が異なることは述べてきたが、図-12に示すとおり、センサーの種類によって伝播速度の測定値に差が生じ、特にセンサーの種類による影響が大きいことが分かった。これは、減衰等の影響によるものと

表-4 計算に用いた値

	伝播速度 (75kHz)	骨材量 (%)	骨材の伝播速度 (m/sec)	修正伝播速度 (m/sec)	総細孔量 (cc/g)	有効細孔量 (cc/g)
A覆道	4031	72.5	4450	2912	0.0807	0.2306
B覆道	4236	71.3	4692	3104	0.0701	0.2003
C覆道	海側	4384	70.0	4692	0.0623	0.1780
	山側	4250	70.0	4692	0.0677	0.1934

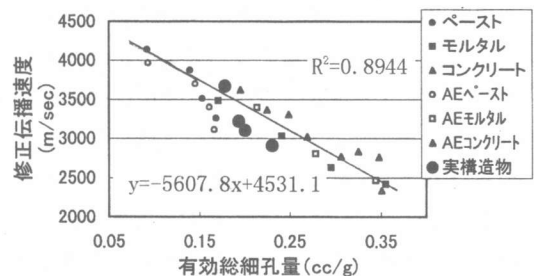


図-10 修正伝播速度と有効総細孔量の関係

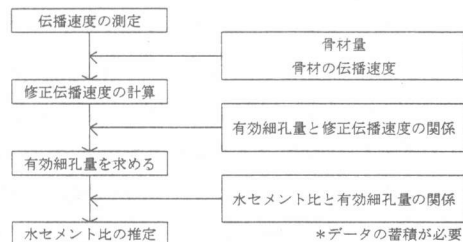


図-11 コンクリート品質評価の手順

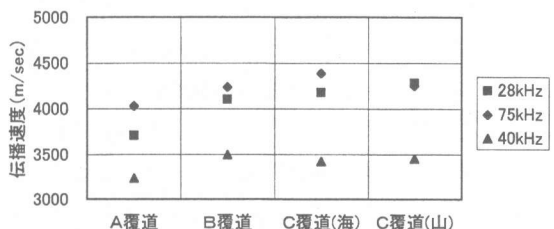


図-12 センサーの種類毎の伝播速度の違い

表-5 センサーの影響

	周波数	センサーの大きさ	測定対象	係数	備考
センサー1	28KHz	20mm	柱断面 コア軸方向	1.05	汎用性センサー
センサー2	75KHz	50mm	昨年までの 室内試験	基準	特注センサー
小型 センサー	40KHz	5mm	孔間	1.25	特注センサー

思われるが、明確に説明するに至っていない。そこで、それぞれのセンサーの影響を取り除くために、表-5に示す通り、今回は75KHzを基準とし、他のセンサーでも同じ伝播速度になるように係数を掛けることで対応した。

手順としては、まず実構造物の伝播速度を測定する。この時できる限り骨材量と骨材の伝播速度を調べておくことが望ましい。そして測定結果から修正伝播速度を計算する。ここで、有効細孔量と修正伝播速度の関係はほぼ直線関係にあると仮定すると（今までの室内試験、今回の現場実験ではほぼ直線関係が認められた）、この結果から有効細孔量を求めることができる。次に、水セメント比と有効細孔量の関係に相関関係があると仮定すると（データは少ないが、今までの室内試験では相関関係があることが認められる）、水セメント比を推定することができる。この手順により、一例としてA、B覆道の結果を求めてみる。計算に用いた有効細孔量と修正伝播速度の関係は式(1)を、水セメント比と有効細孔量の関係は式(2)の近似式を用いて計算した。この近似式は、今までに行ってきた室内試験の結果<sup>2)</sup>と図-10から求めたものである。

$$\text{修正伝播速度} = -5607.8 \times \text{有効細孔量} + 4531.1 \quad (1)$$

$$\text{有効細孔量} = 0.0044 \times \text{水セメント比} + 0.0359 \quad (2)$$

水セメント比と有効細孔量の関係は、データ数が少ないため現時点では、信頼性は低いと思われるが、今後のデータの蓄積により更新していく予定である。ここで示した近似式により、図-12のように、A、B覆道の見かけの水セメント比を推定してみる。ここでは、近似式に用いた水セメント比の範囲が40~70%であることから、40%以下や70%以上はあくまでも参考値として示す。全体的には、B覆道の方がA覆道よ

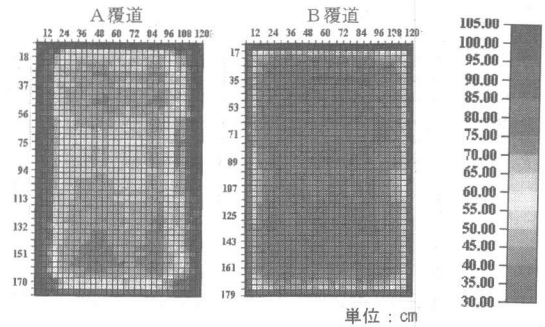


図-12 水セメント比の推定結果

りも品質がよいと評価できた。また、A、B覆道とも、内部の見かけの水セメント比は、40~55%程度であるが、設計上の水セメント比が45~50%であることから、ほぼ妥当な値と思われる。一方、表面部の見かけの水セメント比は、内部に比べて全体的に大きめになっている。

## 5. まとめ

- (1) コンクリートの品質は、表面強度や表面伝播速度の測定で定性的には評価できるが、定量的には難しいと思われる。
- (2) コンクリート表面部の品質は、内部より悪いと考えられる。
- (3) 有効細孔量と水セメント比の関係については広い範囲の検討が必要ではあるが、ここで示した手法はコンクリートの品質評価を行うにあたり大きな可能性があると思われる。

謝辞：この研究を行うにあたっては、東横エルメスの丸茂氏には多大の協力を頂きました。

## 参考文献

- 1) 坂本守, 山下英俊, 堺孝司, 丸茂文夫: 超音波法によるセメント硬化体の品質評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集第20巻, 第1号, pp. 335-340, 1998
- 2) 山下英俊, 堺孝司, 嶋田久俊, 丸茂文夫: セメント硬化体の超音波伝播速度に及ぼす骨材および細孔構造の影響, コンクリート工学年次論文報告集第21巻, 第2号, pp. 1273-1277, 1999